

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΟΠΛΙΣΜΩΝ ΓΕΦΥΡΑΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Προπτυχιακός Φοιτητής Π.Π., gpapado1997@gmail.com

ΣΥΡΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Προπτυχιακός Φοιτητής Π.Π., konstantinos.syros@gmail.com

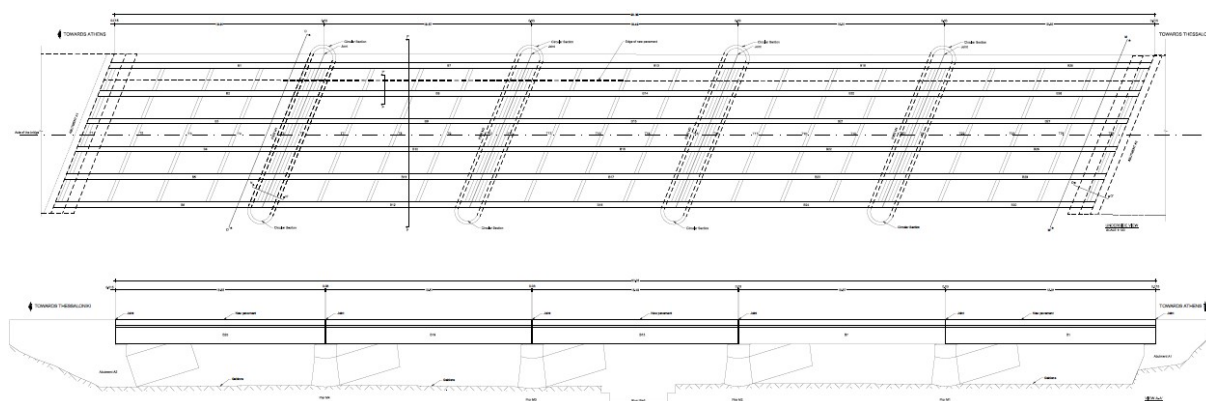
Περίληψη

Ο στόχος της παρούσας εργασίας αρχικά ήταν η μελέτη ενίσχυσης ή επισκευής γέφυρας οπλισμένου σκυροδέματος. Μετά από την ανάγνωση και βαθύτερη κατανόηση της μελέτης αποτίμησης, στην οποία θα βασιζόταν αυτό το εκπόνημα, διαφάνηκε ως ανάγκη, αλλά και ως στόχος με ακόμα μεγαλύτερο ενδιαφέρον, η διερεύνηση και η περαιτέρω ανάδειξη του φαινομένου της διάβρωσης του χάλυβα σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, κύριο πρόβλημα της γέφυρας αυτής. Ακολούθησε ανάλυση στοιχείου δοκού, βάσει των δεδομένων της γέφυρας, με τη βοήθεια προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων και εξαγωγή πινάκων και διαγραμμάτων με επίκεντρο τις αναπτυσσόμενες τάσεις και μετακινήσεις. Τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν δηλώνουν εμφατικά την συμβολή της διάβρωσης στη φέρουσα ικανότητα μιας κατασκευής, καθώς και την ανάγκη του μηχανικού να δίνει την πρέπουσα σημασία σε αυτό το πρόβλημα.

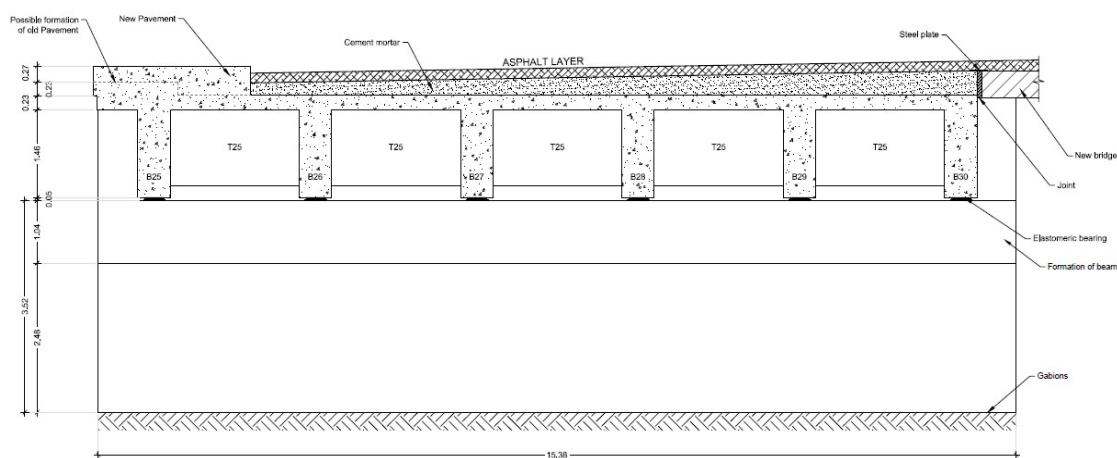
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΟΡΕΑ

Αποφασίστηκε να εξεταστεί ένας φορέας ξεχωριστός των όσων έχουν διδαχθεί μέχρι τώρα, λόγω της επιθυμίας των γραφόντων να επεκτείνουν τις γνώσεις τους σε τμήματα της επιστήμης τα οποία ξεπερνούν τα προπτυχιακά εξεταζόμενα αλλά και την εφαρμογή των κεκτημένων γνώσεων σε ένα ενδιαφέρον πραγματικό αντικείμενο. Με αυτό το πρίσμα αποκτήθηκαν τα σχέδια και η Αναφορά Αποτελεσμάτων Αποτίμησης Υλικών (έτος εκπόνησης: 2015) μιας γέφυρας αυτοκινητοδρόμου. Σύμφωνα με επιθυμία του παρόχου δεν θα αναφερθεί η ακριβής θέση της κατασκευής. Εξετάζοντας τις βλάβες που είχε η γέφυρα προέκυψε πως, πριν την οποιαδήποτε πρόταση επισκευής ή ενίσχυσης, είχε προτεραιότητα η εξέταση της επίδρασης του φαινομένου της διάβρωσης του χάλυβα των οπλισμών. Καθώς το ζήτημα αυτό θεωρήθηκε αρκετά ενδιαφέρον η εργασία αυτή επικεντρώνεται στην διερεύνηση της αλληλεπίδρασης του διαβρωμένου χάλυβα με το σκυρόδεμα, σύμφωνα με τα δεδομένα της γέφυρας, κάνοντας χρήση ανάλυσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η γέφυρα είναι πέντε ανοιγμάτων και έχει συνολικό μήκος περίπου 94m και πλάτος 14m. Το κατάστρωμα της γέφυρας συνθέτουν πέντε επί μέρους κομμάτια, τα οποία είναι μονολιθικές κατασκευές, αποτελούμενες από πλάκα και δοκούς οπλισμένου σκυροδέματος. Κάθε άνοιγμα έχει μήκος 18,5 m. Η γεωμετρία του φορέα φαίνεται στις εικόνες 1.1, 1.2. Τα κομμάτια αυτά στηρίζονται σε τέσσερα βάθρα, τραπεζοειδούς διατομής και σε δύο ακρόβαθρα, αποτελούμενα από οπλισμένο σκυρόδεμα, μέσω ελαστικών εφεδράνων.



Εικόνα 1.1: Κάτοψη και Πλάγια όψη Γέφυρας



Εικόνα 1.2: Τυπική Διατομή Γέφυρας.

Ανοικοδομήθηκε την δεκαετία του 1960 για την γεφύρωση των όχθων κοίτης ποταμού στο πλαίσιο εργασιών σημαντικού οδικού άξονα της χώρας. Μεταγενέστερα κατασκευάστηκε, επαπτομενικά σε αυτή, άλλη γέφυρα οπλισμένου σκυροδέματος με σκοπό την διαπλάτυνση της οδού. Οι δυο αυτοί φορείς δεν συνδέονται, λειτουργούν επομένως ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο.



Εικόνα 1.3: Άποψη της Γέφυρας.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΛΑΒΩΝ – ΑΙΤΙΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΗΣ

Σύμφωνα με την αναφορά των βλαβών της γέφυρας τα κύρια προβλήματα της είναι η διάβρωση του οπλισμού στις περιοχές των κόμβων και των υδρορροών, μεγάλες περιοχές

σκυροδέματος περιέχουσες κοιλότητες στο κάτω μέρος των διαμήκων δοκών και σημεία όπου η επικάλυψη σκυροδέματος των διαμήκων δοκών έχει αποκολληθεί στις περιοχές των στηρίξεων. Βάσει των παραπάνω στοιχείων έγινε πληθώρα ερευνών για την εξακρίβωση των αντοχών και της συμπεριφοράς των υλικών.

Οι γράφοντες, μελετώντας τα αποτελέσματα και το φωτογραφικό υλικό, έχοντας την συμβουλή του αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών Χ.Αποστολόπουλου, περιγράφουν την κατάσταση των βλαβών διαφορετικά. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1 τα κομμάτια του χάλυβα τα οποία αποσπάστηκαν από διάφορα τμήματα της γέφυρας- και όχι μόνο από τα σημεία τα οποία στην αναφορά χαρακτηρίζονται ως προβληματικά- παρουσιάζουν ομοιόμορφη διάβρωση και έχουν χάσει ποσοστό μάζας που φαίνεται στον πίνακα 2.1.



Εικόνα 2.1: Δοκίμια Οπλισμού Γέφυρας.

Στο έργο έχει χρησιμοποιηθεί λείος χάλυβας S220, οι ράβδοι του οπλισμού λοιπόν έχουν μεν χαμηλότερη τάση διαρροής από τους σύγχρονους χάλυβες αλλά εμφανίζουν και πολύ καλύτερη συμπεριφορά σε διάβρωση σε σχέση με αυτούς, γιατί εμπεριέχουν, λόγω της διαφορετικής διαδικασίας παραγωγής, πολύ μεγαλύτερο ποσοστό μεταλλεύματος.

Στοιχεία δείγματος	Μάζα ανά μήκος (gr/mm)	Όνομ. διάμετρος (mm)	Όνομ. διατομή (mm ²)	Πραγμ. διατομή (mm ²)	Τάση διαρροής f_y (MPa)	Εφελκυστική αντοχή f_t (MPa)	f_t/f_y	ϵ_s (%)
X1- S220 Λείος	1,375	16	201,0	175,2	330	400	1,21	35
X2 - S220 Λείος	1,507	16	201,0	192,6	301	400	1,33	26
X3 - S220 Λείος	2,831	22	380,0	361,0	295	384	1,30	-
X4- S220 Λείος	2,300	20	314,0	293,1	266	360	1,36	27
X5 - S220 Λείος	1,476	16	201,0	188,0	313	358	1,14	43
X6 - S220 Λείος	1,444	16	201,0	183,9	304	358	1,18	39
X7 - S220 Λείος	1,447	16	201,0	184,3	311	374	1,20	39
X8 - S220 Λείος	1,476	16	201,0	188,0	284	344	1,21	42

Πίνακας 2.1: Αποτελέσματα Δοκιμών Εφελκυσμού



Εικόνα 2.2: Διάβρωση Οπλισμών στην Περιοχή των υδρορροών

Η εντονότερη διάβρωση, η οποία παρουσιάζεται στους κάτω οπλισμούς των διαμήκων δοκών της πλευράς της γέφυρας στην οποία βρίσκονται οι υδρορροές (Εικόνα 2.2), δεν έχει προκληθεί από κάποιον αυστηρά τοπικό μηχανισμό όπως είναι π.χ. η προσβολή από χλωριόντα. Έχει προκληθεί όμως από το μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας, το οποίο μέσω των πόρων του σκυροδέματος, ερχόταν σε επαφή με τον χάλυβα και επιτάχυνε την διαδικασία της διάβρωσης, επιφανειακά ομοιόμορφα, στις περιοχές όπου υπάρχει αυξημένη παρουσία και ροή νερού, κατά το διάστημα όπου ο οπλισμός ήταν καλυμμένος. Στις συγκεκριμένες περιοχές, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, οι επικάλυψεις έχουν αποκολληθεί, αυτό συμβαίνει λόγω του μεγαλύτερου όγκου που σχηματίζουν τα προϊόντα της διάβρωσης. Μετά την αποτίναξη της επικάλυψης, τον βαθμό διάβρωσης αυξάνει η συνεχής επαφή με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας.

Αξιοσημείωτο είναι πως δεν εμφανίζονται ρωγμές στην επιφάνεια του σκυροδέματος, ενώ υπάρχουν περιοχές με αποτιναγμένες επικάλυψεις. Αυτό συμβαίνει γιατί, παρά την προχωρημένη διάβρωση των οπλισμών, η οποία θα δικαιολογούσε την ύπαρξη ρωγμών, το πορώδες του σκυροδέματος είναι τόσο μεγάλο, ώστε ο χάλυβας έχει τον χώρο να διογκωθεί χωρίς να δημιουργήσει τάσεις αστοχίας στο σκυρόδεμα.

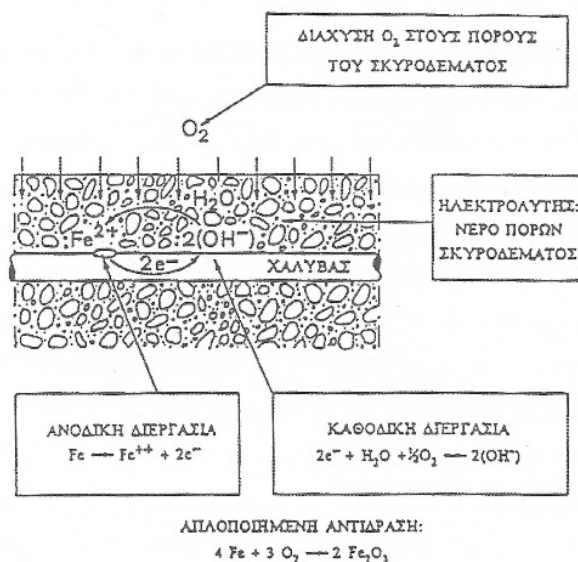
Συμπερασματικά η κύρια αιτία των προβλημάτων και βλαβών της γέφυρας είναι η κακή σκυροδέτηση κατά την κατασκευή του έργου, αφού δεν εφαρμόστηκε δόνηση ή εφαρμόστηκε ανεπαρκώς. Το μεγάλο πορώδες του προκύπτοντος σκυροδέματος οδήγησε στη διάβρωση των ράβδων οπλισμού. Άρα η θεμελιώδης βλάβη της γέφυρας είναι η διάβρωση του χάλυβα. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο πρέπει να διερευνηθούν οι επιπτώσεις της στην κατασκευή.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Για την καλύτερη κατανόηση της διάβρωσης και των επιπτώσεών της κρίθηκε χρήσιμη η παράθεση περιγραφής του φαινομένου.

Η διάβρωση του χάλυβα αποτελεί ένα παράδειγμα οξειδωσης, πρόκειται για μια ηλεκτροχημική αντίδραση με ηλεκτρολύτη το νερό των πόρων. Τις ράβδους οπλισμού αρχικά καλύπτει ένα λεπτό φιλμ οξειδωσης το οποίο δημιουργείται κατά την παρασκευή του οπλισμένου σκυροδέματος, η στρώση αυτή προστατεύει τον χάλυβα από περεταίρω διάβρωση. Σε περίπτωση όμως όπου η στρώση αυτή τοπικά καταστραφεί δημιουργείται άνοδος, απ' όπου τα κατιόντα σιδήρου διαλύονται στο νερό των πόρων αφήνοντας πίσω τους ελεύθερα ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά κινούνται μέσω της ράβδου οπλισμού προς την κάθοδο, που μπορεί να σχηματιστεί σε οποιοδήποτε σημείο της ράβδου. Στην κάθοδο, που μπορεί να είναι και το σύνολο της επιφάνειας της ράβδου, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια

συνδυάζονται με το νερό των πόρων του σκυροδέματος και με το διαλυμένο σε αυτό οξυγόνο (της αέριας φάσης των πόρων), δίνοντας υδροξύλιο (OH⁻). Τα ανιόντα υδροξυλίου κινούνται μέσω του νερού των πόρων προς την άνοδο, όπου αντιδρούν με τα διαλυμένα κατιόντα σιδήρου, σχηματίζοντας έτσι οξειδία του σιδήρου (σκουριά) και ανασυνθέτοντας το νερό που έχει ηλεκτρολυθεί στην κάθοδο. Πρέπει να τονιστεί πως η ύπαρξη του νερού είναι τελείως απαραίτητη για την αντίδραση παρόλο που η συνολική αντίδραση είναι μόνο μεταξύ οξυγόνου και σιδήρου.[1]



Εικόνα 3.1: Ηλεκτροχημικές Διαδικασίες Διάβρωσης [1]

Η διάβρωση του χάλυβα μειώνει τη διατομή των ράβδων οπλισμού αλλά και την ολκιμότητά τους. Επιπλέον, επειδή τα προϊόντα της διάβρωσης καταλαμβάνουν αρκετά μεγαλύτερο όγκο (κατά 2-6 φορές) από αυτόν που τα δημιούργησε, η σκουριά προκαλεί εσωτερικές τάσεις στο σκυρόδεμα που την περιβάλλει οδηγώντας σε διάρρηξη κατά ακτινικά επίπεδα που διέρχονται από τον άξονα της ράβδου. Όταν η επικάλυψη σκυροδέματος είναι μικρού πάχους και/ή ο εγκάρσιος στη διαβρωμένη ράβδο οπλισμός είναι λίγος, η ρηγμάτωση αυτή φθάνει στην επιφάνεια του σκυροδέματος αποτινάσσοντας την επικάλυψη, μειώνοντας την συνάφεια του οπλισμού με το σκυρόδεμα και εκθέτοντας ακόμα περισσότερο τον οπλισμό σε διάβρωση.[1]

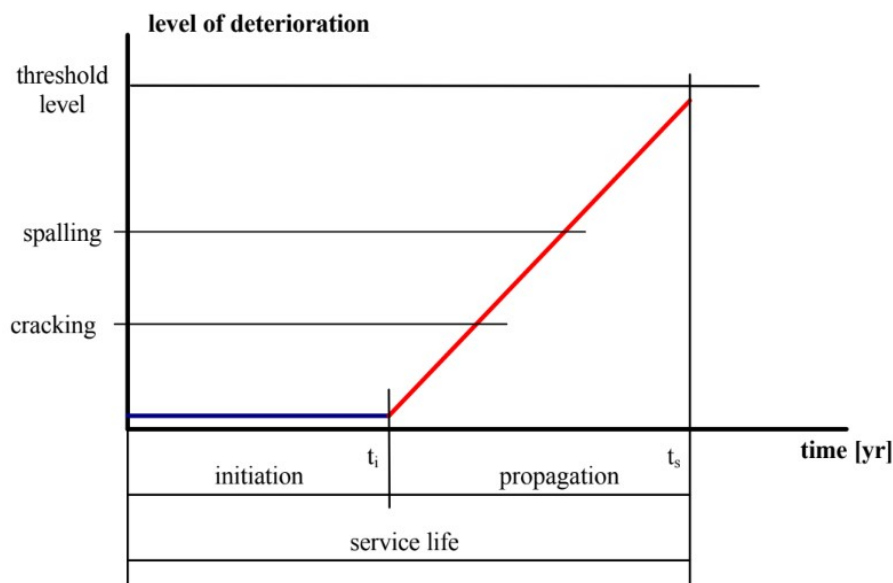
Στην περίπτωση της μελετώμενης γέφυρας η διάβρωση προκαλείται κυρίως από την ενανθράκωση του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα η ενανθράκωση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο μεταβάλλεται το pH του σκυροδέματος παρουσία διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Η αρχική αλκαλικότητα του σκυροδέματος χαρακτηρίζεται από μία τιμή του pH γύρω στο 12.5, που αντιστοιχεί στην υπό συνήθη θερμοκρασία συγκέντρωση ισορροπίας του υδροξειδίου του ασβεστίου Ca(OH)₂, στο νερό των πόρων. Το προστατευτικό στρώμα οξειδίου διαλύεται, λόγω μείωσης της αλκαλικότητας του σκυροδέματος γύρω από την ράβδο, σε τιμές του pH κάτω από 9.0. Η μείωση του pH του σκυροδέματος σε αυτές τις τιμές οφείλεται στην χημική αντίδραση του Ca(OH)₂ του νερού των πόρων (και γενικότερα του στερεού ιστού του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού) με το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) της ατμόσφαιρας, που σταδιακά διαχέεται προς το εσωτερικό του σκυροδέματος μέσω της αέριας φάσης των πόρων. Τότε ο χάλυβας του οπλισμού αποπαθητικοποιείται (δεν απολαμβάνει πλέον την παθητική προστασία που του προσέφερε η αλκαλικότητα του σκυροδέματος), οπότε και προσβάλλεται από τα χλωριόντα τα οποία δεν δεσμεύονται πια από το Ca(OH)₂. Η

ενανθράκωση και η διείδυση χλωριόντων δεν είναι ανεξάρτητες διαδικασίες, καθότι η πρώτη επιταχύνει τη δεύτερη. Παρόλα αυτά η οξεία προσβολή χλωριόντων διαφέρει σαν φαινόμενο στον χρόνο και στο αποτέλεσμα από αυτό της ενανθράκωσης. [2]



Εικόνα 3.2: Απεικόνιση της Διαδικασίας Σταδιακής Ενανθράκωσης και Εκτίναξης του Σκυροδέματος[3]

Έρευνες έχουν δείξει ότι η ενανθράκωση του σκυροδέματος προχωρεί προς το εσωτερικό του με ρυθμό περίπου 1mm ανά έτος. Αυτό σημαίνει ότι ακόμη και στην ιδανική περίπτωση όπου έχει τηρηθεί η προβλεπόμενη από τους κανονισμούς επικάλυψη των 20mm σε μια κατασκευή, της οποίας το σκυρόδεμα δεν παρουσιάζει καμία ατέλεια (ρωγμή) είτε κατά την κατασκευή είτε κατά τη διάρκεια ζωής της λόγω σεισμικών δονήσεων ή διαφορικών καθιζήσεων, μετά από περίπου 20 χρόνια αναμένεται η έναρξη της διάβρωσης του σιδηροπλισμού της. Λόγω ενανθράκωσης του σκυροδέματος παρατηρείται συνήθως ομοιόμορφη διάβρωση του σιδηροπλισμού.[3]



Διάγραμμα 3.1: Μοντέλο Tuutti [4]

Το μοντέλο Tuutti(1982) λαμβάνεται συχνά ως βάση αξιολόγησης της μείωσης της λειτουργικότητας κατά τη διάρκεια της ζωής του υλικού. Το διάγραμμα του μοντέλου αποτελείται από δύο στάδια. Το πρώτο κατά το οποίο επιβλαβή στοιχεία διαπερνούν την επικάλυψη του οπλισμού και το δεύτερο κατά το οποίο λαμβάνει δράση η διάβρωση. Για μεγαλύτερες κατασκευές, όπως οι γέφυρες, αν σε ένα μόνο σημείο παρατηρείται έντονη διάβρωση, όπως αυτή που προκαλείται από οξεία προσβολή χλωριόντων, οι επιπτώσεις για

την φέρουσα ικανότητα είναι ελάχιστες. Οι επιπτώσεις μιας πιο ήπιας διάβρωσης, στο σύνολο όμως της κατασκευής, όπως η διάβρωση που προκαλείται από την ενανθράκωση, είναι πολύ σοβαρότερες. [4]

Αφού η διάβρωση είναι ομοιόμορφη η παραμένουσα διατομή οπλισμού \varnothing_{res} μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

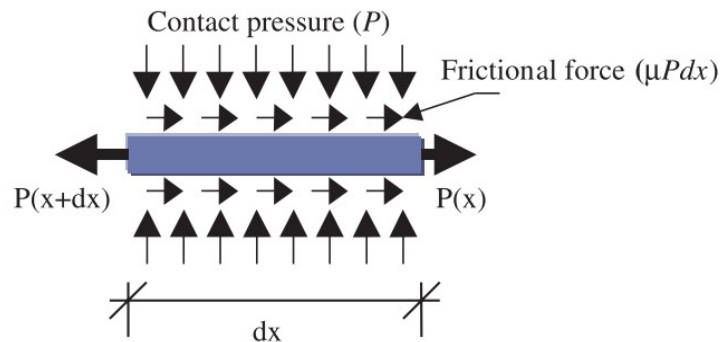
$$\varnothing_{res} = \varnothing_{rebar} - \lambda \cdot i_{cor} \cdot t_p \quad (\text{mm}) \quad [4]$$

i_{cor} : μέσος ρυθμός διάβρωσης σε mA/m^2 , όπου $\text{mA}/\text{m}^2 = 1,16 \mu\text{m}/\text{yr}$

$\lambda = 2,3294 \cdot 10^{-3}$ σε $\text{mm}/(\text{mA}/\text{m}^2)$

t_p : η χρονική στιγμή που αρχίζει η διάβρωση

Πέραν της μείωσης της διατομής του χάλυβα μειώνεται, λόγω της μείωσης της τάσης επαφής χάλυβα-σκυροδέματος και ο συντελεστής τριβής μεταξύ των δύο υλικών. Σε υψηλά επίπεδα διάβρωσης, όπου τα προϊόντα της διάβρωσης δρουν σαν λιπαντικό, η ράβδος λειτουργεί ανεξάρτητα από το σκυρόδεμα με συντελεστή τριβής που προσεγγίζει το 0,4. Στην Εικόνα 3.3 φαίνονται οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται μεταξύ της ράβδου οπλισμού και του σκυροδέματος. [5]



Εικόνα 3.3: Δύναμη Τριβής Αναπτυσσόμενη Μεταξύ Χάλυβα-Σκυροδέματος.[5]

4.ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΦΟΡΕΑ

Σκοπός της μοντελοποίησης ήταν η, κατά το δυνατόν καλύτερη, προσομοίωση των συνθηκών που δημιουργούνται στο οπλισμένο σκυρόδεμα από τη διάβρωση του χάλυβα μέσω της χρήσης πεπερασμένων στοιχείων. Από την πληθώρα διαθέσιμων προγραμμάτων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων επιλέχθηκε το ANSYS_APDL_R3 (Studentversion 2019), καθώς οι γράφοντες το έχουν διδαχθεί εισαγωγικά και διότι δίνει την δυνατότητα δημιουργίας συνθηκών επαφής μεταξύ επιφανειών.

Ασφαλώς, για την μελέτη ενός φαινομένου που ανήκει στον μικρόκοσμο του οπλισμένου σκυροδέματος, δεν ήταν υπολογιστικά εφικτό να αναλυθεί ένα από τα πέντε μονολιθικά τμήματα της κατασκευής, ούτε όμως και μια από τις διαμήκειες δοκούς του. Για υπολογιστική ευκολία επιλέχθηκε η μελέτη μίας δοκού διαστάσεων: $b=0.2\text{m}$, $h=0.4\text{m}$ και $L=2\text{m}$. Η δοκός αυτή οπλίστηκε με 2Φ20 στο κάτω και πάνω πέλμα καθ' όλο το μήκος της.

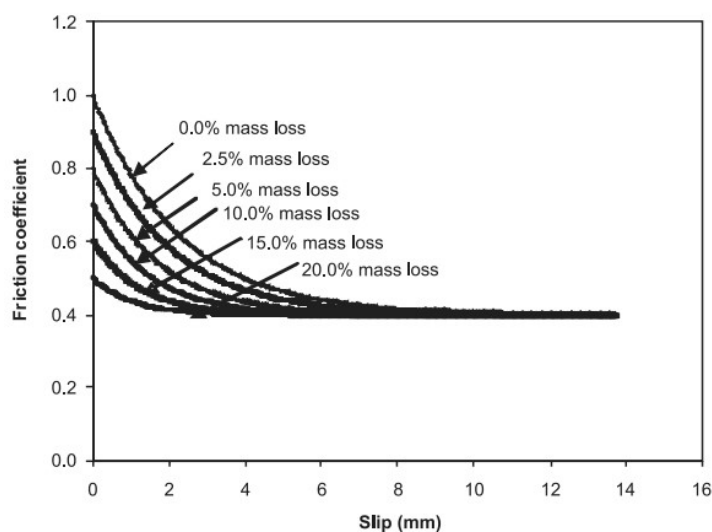
Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε είχε θλιπτική αντοχή $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$, σύμφωνα με τα δείγματα (καρότα), τα οποία αποσπάστηκαν από τις δοκούς της γέφυρας. Από δοκιμές in situ είχε προκύψει επίσης η εφελκυστική αντοχή $f_{ct} = 4 \text{ MPa}$, η οποία όμως δεν χρησιμοποιήθηκε αυτούσια καθώς το πρόγραμμα παρουσίαζε αριθμητική ασυμφωνία. Τελικά ως εφελκυστική αντοχή δόθηκε η $f_{ct} = 3,6843 \text{ MPa}$, αριθμός με μικρή απόκλιση από την πραγματικότητα, ο οποίος ελέγχθηκε με τη δημιουργία καταστατικού νόμου με το πρόγραμμα SAP2000 v14.2. Ως μέτρο ελαστικότητας και λόγος Poisson χρησιμοποιήθηκαν τα $E = 33,5 \text{ GPa}$ και $\nu = 0,2$ αντίστοιχα, για C35/45 [6]. Το μέτρο ελαστικότητας αυτό συμφωνεί με τον προαναφερθέν καταστατικό νόμο.

Ο χάλυβας του οπλισμού ορίστηκε ως λείος, S220, όπως και ο αντίστοιχος της γέφυρας. Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά των εργαστηριακών δοκιμών από τα δοκίμια που πάρθηκαν

από τη γέφυρα, προσδόθηκε τάση διαρροής $f_y = 290\text{ΜΡα}$. Ως μέτρο ελαστικότητας και λόγος Poisson χρησιμοποιήθηκαν τα $E = 200\text{GPa}$ και $\nu = 0,3$. [7]

Εφόσον ο χάλυβας είναι λείος και καθ' όλο το μήκος του ομοιόμορφα διαβρωμένος, ο μηχανισμός συνεργασίας του με το σκυρόδεμα προσομοιάστηκε μέσω της τριβής μεταξύ των επαπτόμενων επιφανειών των υλικών. Η διατομή του χάλυβα δεν δόθηκε ως μειωμένη, διότι στην περίπτωση αυτή δεν θα υπήρχε συνολική επαφή του με την οπή του σκυροδέματος, η οποία μένει αμετάβλητη. Στην πραγματικότητα παρεμβάλλεται μια στρώση από προϊόντα οξείδωσης μεταξύ της εναπομένουσας ράβδου και του σκυροδέματος, αλλά χάριν απλούστευσης και υπολογιστικής ευκολίας, επιλέχτηκε το προαναφερθέν μοντέλο. Ως τάση διαρροής του χάλυβα δόθηκε η πραγματική της τιμή.

Στη μελετώμενη δοκό δεν προστέθηκε διατμητικός οπλισμός καθώς οι γράφοντες δεν κατάφεραν, στο δοθέν χρονικό πλαίσιο, να αποδώσουν τον οπλισμό αυτό με ένα ρεαλιστικό μοντέλο. Πρέπει να σημειωθεί πως ο διατμητικός οπλισμός αυξάνει τον συντελεστή τριβής, λόγω της περίσφιξης που προσφέρει.



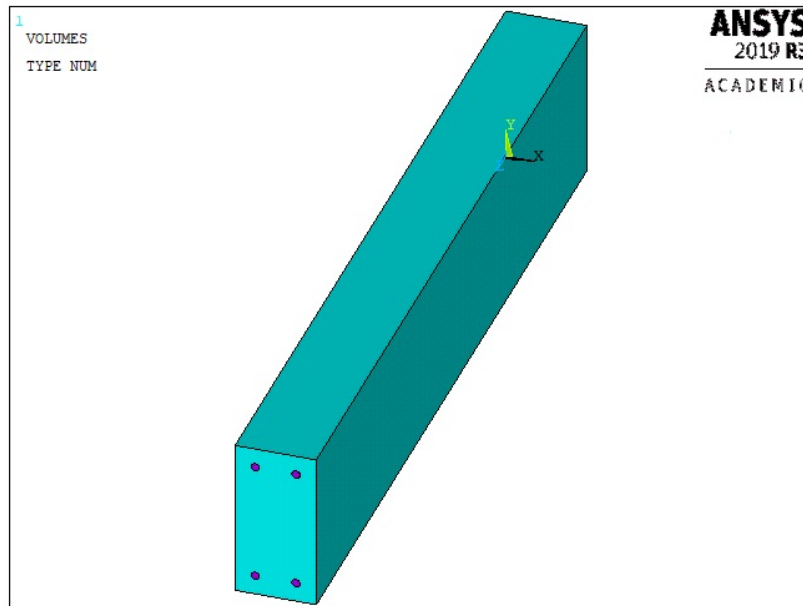
Διάγραμμα 4.1: Συσχετισμός Συντελεστή Τριβής με Ολίσθηση με διαφορετικές απώλειες μάζας [5]

Ενδεικτικά παρατίθεται το διάγραμμα 4.1, το οποίο έχει προκύψει από πειραματικές δοκιμές εξόλκευσης ράβδων οπλισμού. Ακολουθώντας τις τιμές του διαγράμματος θα γίνει έλεγχος για συντελεστές τριβής: 1, 0.8, 0.7, 0.5 και 0.4. Εφόσον έχουμε προσεγγιστικά 10% απώλεια μάζας ο συντελεστής τριβής είναι 0.7, παρόλα αυτά γίνονται δοκιμές με διάφορους συντελεστές τριβής σε διάφορες φορτίσεις της δοκού για να αποτιμηθεί η συμβολή της διάβρωσης στη συμπεριφορά του φορέα και στην ανάπτυξη τάσεων στα δύο υλικά. Η δοκός ελέγχεται επίσης, για κάθε αλλαγή του συντελεστή τριβής σε κάθε φόρτιση, ως οι οπλισμοί της να μην ήταν διαβρωμένοι, δηλαδή σαν το σκυρόδεμα και ο χάλυβας να βρίσκονται σε συνεχή επαφή.

Η φόρτιση η οποία εφαρμόστηκε ήταν η μονοαξονική κάμψη καθώς κατά την φόρτιση αυτή ενεργοποιείται ο μηχανισμός τριβής χάλυβα σκυροδέματος με τον επιθυμητό τρόπο.

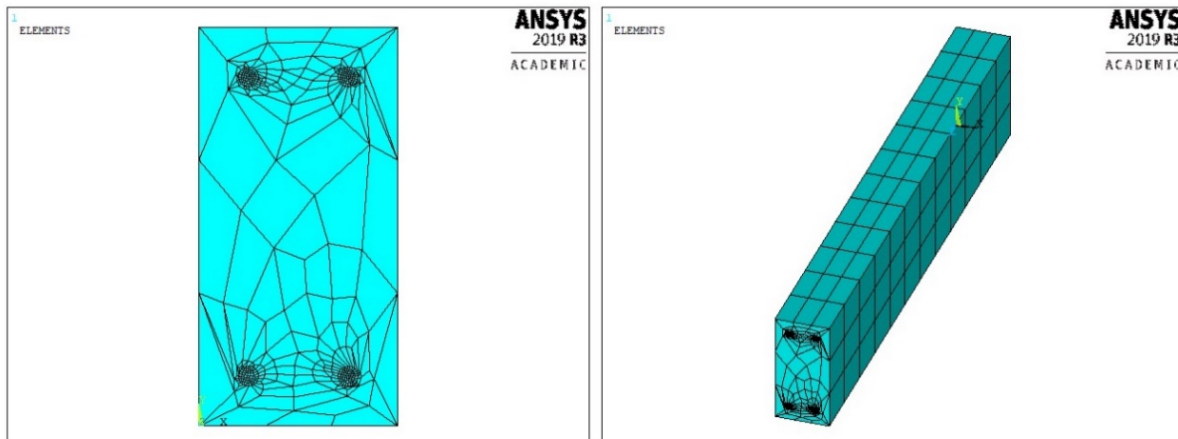
Η δοκός είναι προσομοιωμένη ως στερεό σώμα χρησιμοποιώντας το στοιχείο SOLID65 του ANSYS. Οι οπλισμοί αποτελούνται από το χωρικό στοιχείο SOLID185[8].

Περιγράφοντας τα βήματα που ακολουθήθηκαν, ορίστηκαν οι ιδιότητες του σκυροδέματος και του χάλυβα και στη συνέχεια σχεδιαστικέ ο όγκος της δοκού. Σε αυτόν τον όγκο έγιναν 4 οπές διαμέτρου 20mm και μήκους 2m, δηλαδή όσο και το μήκος της δοκού. Η επικάλυψη που δόθηκε ήταν $c = 40\text{mm}$. Εσωτερικά των οπών σχεδιάστηκαν οι οπλισμοί ως όγκοι.



Εικόνα 4.1: Όγκος Δοκού με τους Οπλισμούς.

Ακολούθως δόθηκαν στον ορθογώνιο όγκο και στις τέσσερις ράβδους οι ιδιότητες τους. Στη συνέχεια έγινε η διακριτοποίηση των οπλισμών και του σκυροδέματος με την εντολή MESHTOOLSHEXSWEEP.

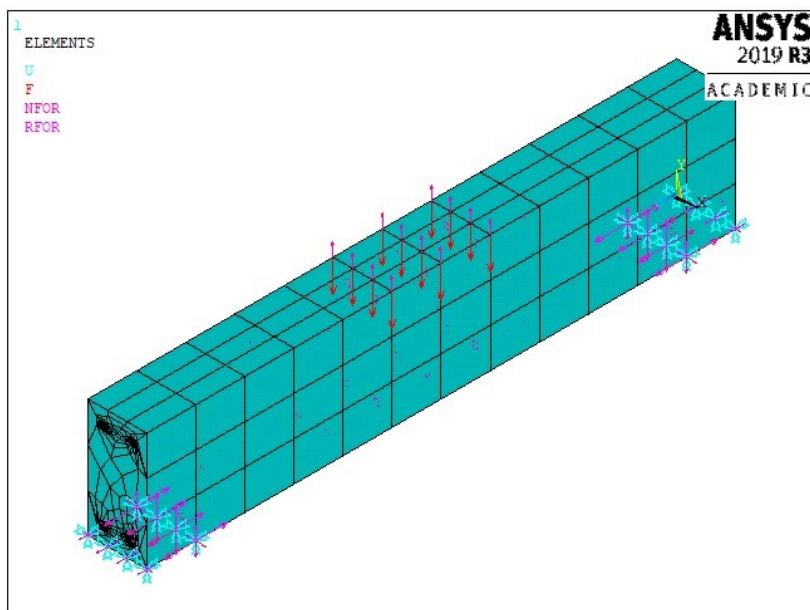


Εικόνα 4.2: Διακριτοποιημένη Δοκός Έπειτα από την Εντολή SWEEP

Έχοντας ορίσει τον φορέα προχωράμε στον ορισμό της συνθήκης επαφής των οπλισμών με το σκυρόδεμα με την εντολή CONTACTPAIR. Σε αυτό το σημείο δηλώνεται ο συντελεστής τριβής μεταξύ των δύο αναφερόμενων υλικών καθώς επίσης και πώς θα αντιμετωπίσει το πρόγραμμα την επαφή, δηλαδή απλή επαφή, μη διαχωρίσιμες επιφάνειες, τραχεία επαφή κλπ. Λόγω λείου οπλισμού επιλέγεται αρχικά η απλή επαφή (BEHAVIOROFCONTACTSURFACESTANDARD).

Αφού πλέον η δοκός είναι σχεδιασμένη, όπως και έχει δοθεί κάθε απαραίτητο στοιχείο σχετικό με τα υλικά και τις σχέσεις τους ακολουθεί ο καθορισμός των στηρίξεων. Επιλέγονται οι κόμβοι, οι οποίοι έχουν δημιουργηθεί κατά την διακριτοποίηση, στις δύο άκρες της δοκού, στο κάτω πέλμα και δεσμεύονται όλοι οι βαθμοί ελευθερίας (DIFINELOADSAPPLYSTRUCTURALDISPLACEMENTONNODES και επιλέγεται η συνθήκη ALLDOFs). Μετά ορίζεται σε ποιους κόμβους θα δρουν τα φορτία. Επιλέγονται 12 κόμβοι στο μέσον της δοκού και ορίζεται η αρχική φόρτιση, σε κάθε κόμβο τοποθετείται

φορτίο στον y άξονα ίσο με 10kN, επομένως σχηματίζεται αρχικά μία συνολική φόρτιση της τάξης των 120kN με διεύθυνση προς τα αρνητικά του άξονα y. Τέλος πραγματοποιείται επίλυση πατώντας SOLVECURRENTLS.



Εικόνα 4.3: Η Δοκός Μετά την Εφαρμογή Φορτίων και Καθορισμό Στηρίξεων.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν και τα οποία θα συγκριθούν στις περιπτώσεις συνολικής φόρτισης 120kN, 180kN και 240kN, οι οποίες έχουν προαναφερθεί είναι η μέγιστη μετατόπιση που εμφανίζεται στην δοκό, οι μέγιστες (εφελκυστικές) και ελάχιστες (θλιπτικές) τάσεις που αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα και στον χάλυβα στην διεύθυνση z, δηλαδή παράλληλες στον άξονα της δοκού.

Αρχικά εφαρμόζεται συνολικό φορτίο $F_y = -120\text{kN}$ στο μέσο του ανοίγματος και προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

- Για συνθήκη κανονικής επαφής (STANDARD) έχουμε:

		CONCRETE		STEEL	
	DISP	SZ		SZ	
μ	DMX(mm)	SMX(kN/m ²)	SMN(kN/m ²)	SMX(kN/m ²)	SMN(kN/m ²)
1	0,195	3624,29	-5844,84	7077,06	-13058,1
0,8	0,196	3649	-5892,14	6337,63	-11044
0,7	0,196	3662,25	-5917,37	5944,68	-9980,17
0,5	0,198	3690,88	-5971,43	5064,57	-7807,86
0,4	0,198	3706,45	-6000,51	4550,59	-6647,65

Όπου SZ είναι οι τάσεις στον άξονα τον z, SMX είναι οι μέγιστες, SMN οι ελάχιστες και DMX η μέγιστη μετατόπιση κατά τον κατακόρυφο άξονα, τον άξονα y.

Για $\mu = 0,4$ εμφανίζονται οι πρώτες ρωγμές αφού ήδη από το $\mu = 0,5$ έχει ξεπεραστεί οριακά η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος.

- Για συνθήκη BONDED, που προσομοιάζει οπλισμό χωρίς διάβρωση έχουμε:

		CONCRETE		STEEL	
	DISP	SZ		SZ	
M	DMX(mm)	SMX(kN/m ²)	SMN(kN/m ²)	SMX(kN/m ²)	SMN(kN/m ²)
1	0,188	3429,15	-5593,52	11758,1	-21802,9

Στη συνέχεια εφαρμόζεται συνολικό φορτίο $F_y = -180\text{kN}$ και προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

- Για συνθήκη κανονικής επαφής (STANDARD) έχουμε:

		CONCRETE		STEEL	
	DISP	SZ		SZ	
μ	DMX(mm)	SMX(kN/m ²)	SMN(kN/m ²)	SMX(kN/m ²)	SMN(kN/m ²)
1	0,366	2466,02	-11186,8	19176,8	-25527,9
0,8	0,370	2646,5	-11297	16960,4	-21793,3
0,7	0,373	2734,39	-11355,9	15854,4	-19813,1
0,5	0,375	3042,75	-11446,5	13252,7	-15631,2
0,4	0,376	3065,74	-11521,3	11873,5	-13464,7

Σε αυτή τη φόρτιση παρατηρούνται ρωγμές σε όλες τις περιπτώσεις του συντελεστή τριβής μ .

- Για συνθήκη BONDED:

		CONCRETE		STEEL	
	DISP	SZ		SZ	
M	DMX(mm)	SMX(kN/m ²)	SMN(kN/m ²)	SMX(kN/m ²)	SMN(kN/m ²)
1	0,334	1982	-9853	39286,6	-38826,4

Τέλος εφαρμόζεται συνολικό φορτίο $F_y = -240\text{kN}$ και προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

- Για συνθήκη κανονικής επαφής (STANDARD) έχουμε:

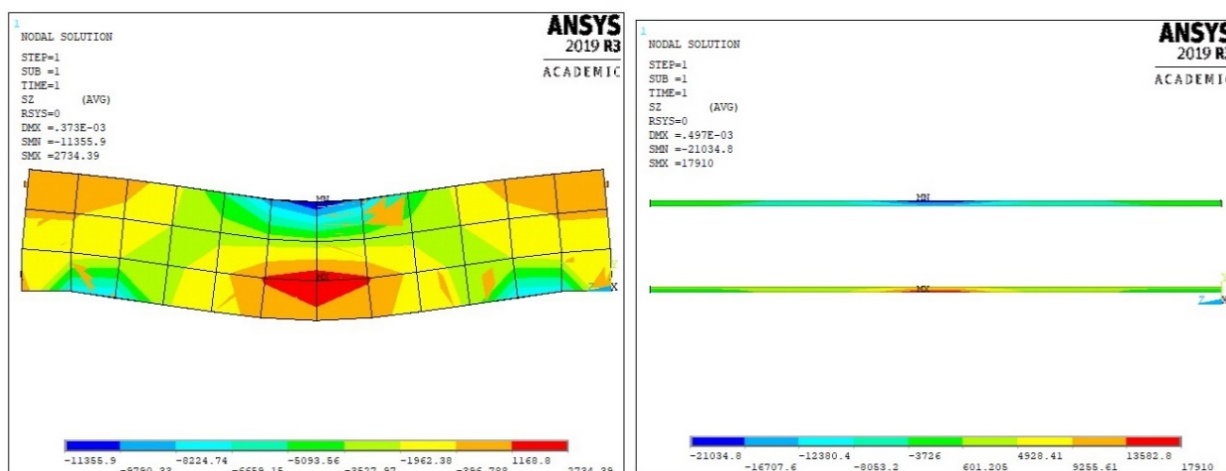
		CONCRETE		STEEL	
	DISP	SZ		SZ	
M	DMX(mm)	SMX(kN/m ²)	SMN(kN/m ²)	SMX(kN/m ²)	SMN(kN/m ²)
1	0,501	1726,82	-14976,2	25482	-34130,4
0,8	0,506	1752,44	-15141,7	22671,3	-29111,8
0,7	0,509	1798,6	-15204,7	21161,7	-26559,1
0,5	0,513	1838,12	-15403,8	17910	-21034,8
0,4	0,517	1932,21	-15536,6	16006,7	-18080,8

Και σε αυτή τη φόρτιση παρατηρούνται ρωγμές σε όλες τις περιπτώσεις του συντελεστή τριβής μ .

- Για συνθήκη BONDED:

		CONCRETE		STEEL	
	DISP	SZ		SZ	
μ	DMX(mm)	SMX(kN/m ²)	SMN(kN/m ²)	SMX(kN/m ²)	SMN(kN/m ²)
1	0,462	2778,12	-13868,1	54558,9	-50833,5

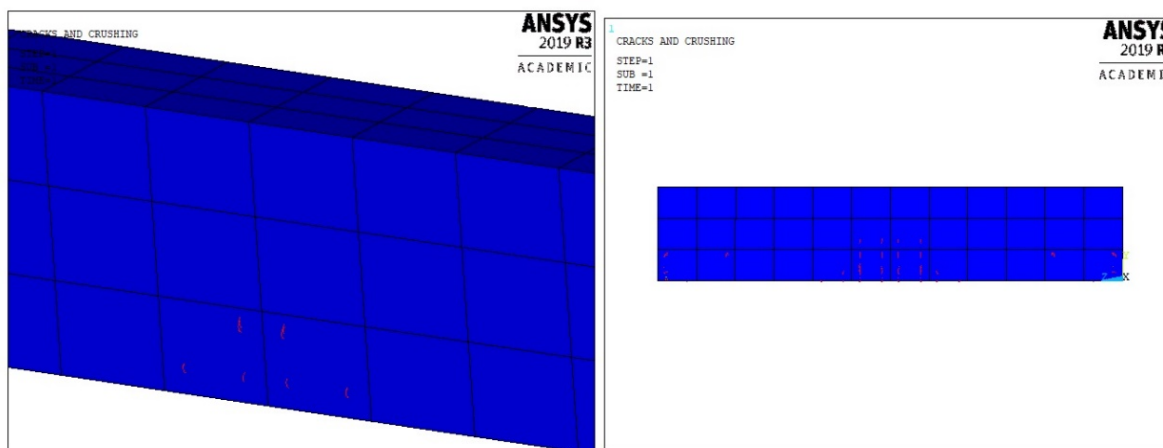
Και σε αυτή την περίπτωση έχουμε ρωγμές.



Εικόνα 5.1: Τάσεις στο Σκυρόδεμα Κατά τη Φόρτιση 180kN, Τάσεις στους Οπλισμούς Κατά τη Φόρτιση 240kN.

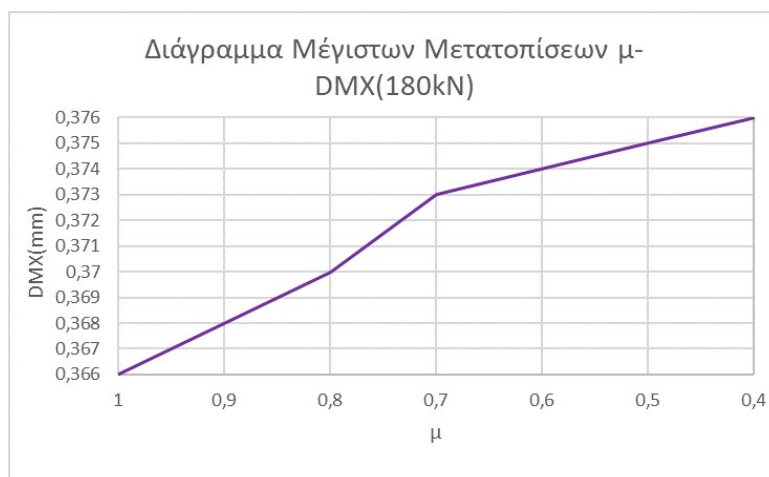
Παρατηρείται στην Εικόνα 5.1 ότι οι μέγιστες τάσεις δεν εμφανίζονται στο κάτω εφελκόμενο πέλμα της δοκού, αλλά λίγο υψηλότερα. Αυτό συμβαίνει καθώς έχουν εμφανιστεί ρωγμές, αφού έχει ξεπεραστεί η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος και οι τάσεις εμφανίζονται πάνω από το επίπεδο της ρωγμής.

Οι ρωγμές αρχίζουν και σχηματίζονται κατά τη φόρτιση των 120kN με συντελεστή τριβής $\mu=0,4$ και συνεχίζουν να εμφανίζονται για όλες τις επόμενες φορτίσεις και όλους τους δοσμένους συντελεστές τριβής. Ξεκινούν από το μέσο του κάτω πέλματος της δοκού και συνεχίζουν προς τα πάνω με τριγωνική μορφή όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 5.2 με κόκκινο χρώμα.



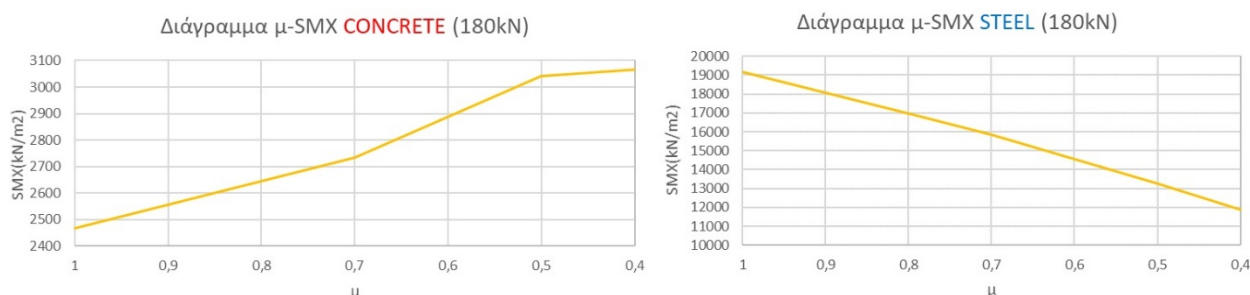
Εικόνα 5.2: Ρωγμές Κατά τη Φόρτιση 180kN(αριστερά) και 240kN(δεξιά).

Παρατίθενται ενδεικτικά τα διαγράμματα της φόρτισης των 180kN. Τα διαγράμματα και των υπολοίπων φορτίσεων είναι παρόμοια σε μορφή. Για τη δημιουργία των διαγραμμάτων καθώς και των πινάκων, όπως και για την γενικότερη διαχείριση δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Excel.



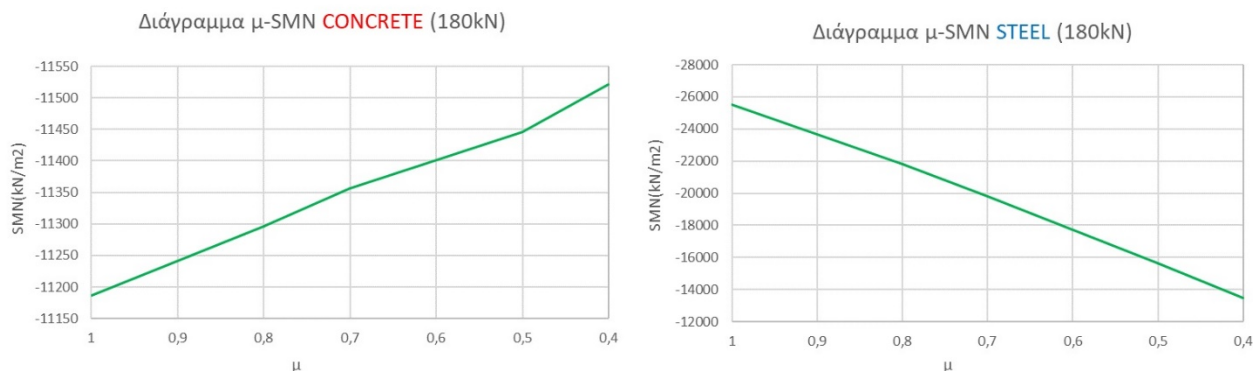
Διάγραμμα 5.1: Συσχετισμός Μέγιστων Μετατοπίσεων με τον Συντελεστή Τριβής

Παρατηρείται στο Διάγραμμα 5.1 πως όσο μειώνεται η τιμή του συντελεστή τριβής οι μετατοπίσεις αυξάνονται σχεδόν γραμμικά. Μικρή ασυνέχεια στην γραμμικότητα του διαγράμματος εμφανίζεται μεταξύ των τιμών του $\mu=0,8$ και $0,7$, όπου εκατέρωθεν του τμήματος αυτού η κλίση των κλάδων είναι σταθερή και ελαφρώς διαφορετική. Επίσης αξιοσημείωτο είναι πως μετά την τιμή $\mu=0,7$ η κλίση του διαγράμματος είναι αισθητά μικρότερη.



Διάγραμμα 5.2: Συσχετισμός Μέγιστων Εφελκυστικών Τάσεων σε Σκυρόδεμα και Χάλυβα με τον Συντελεστή Τριβής

Παρατηρείται στο διάγραμμα 5.2 πως, στον κομμάτι του χάλυβα, όσο μειώνεται ο συντελεστής τριβής τόσο μειώνονται και οι εφελκυστικές τάσεις που παραλαμβάνουν οι οπλισμοί, με τρόπο γραμμικό. Αντίστοιχα, στο κομμάτι του σκυροδέματος, όσο μειώνεται ο συντελεστής τριβής τόσο μεγαλύτερες είναι οι τάσεις που παραλαμβάνει το σκυρόδεμα, με τρόπο προσεγγιστικά γραμμικό. Αξίζει να σημειωθεί πως διακόπτεται η συνέχεια γραμμικότητας μεταξύ των $\mu=0,7$ και $0,5$, εκατέρωθεν των οποίων η κλίση των κλάδων είναι σταθερή και ελαφρώς διαφορετική. Μετά το $\mu=0,5$ η κλίση του διαγράμματος είναι αισθητά μεγαλύτερη.



Διάγραμμα 5.3: Συσχετισμός Μέγιστων Θλιπτικών Τάσεων σε Σκυρόδεμα και Χάλυβα με τον Συντελεστή Τριβής

Στο διάγραμμα 5.3 παρουσιάζονται και στα δύο τμήματά του ακριβώς οι ίδιες συμπεριφορές με αυτές του διαγράμματος 5.2, αυτή τη φορά αφορόντας τις θλιπτικές τάσεις.

Τα αποτελέσματα, τα οποία εμφανίζονται παραστατικά στα διαγράμματα είναι σύμφωνα με την συμπεριφορά του σύνθετου υλικού η οποία αναμένεται. Παρατηρείται δηλαδή πως καθώς μειώνεται ο συντελεστής τριβής, και κατ' επέκταση ο δεσμός χάλυβα- σκυροδέματος εξασθενεί, οι ράβδοι οπλισμού παραλαμβάνουν σταθερά λιγότερες τάσεις, εφελκυστικές αλλά και θλιπτικές, με αποτέλεσμα το σκυρόδεμα να αναγκάζεται, μη ανακουφιζόμενο, να φέρει μεγαλύτερα φορτία με αποτέλεσμα να ρηγματώνεται και να μην υπακούει στις προδιαγραφές σχεδιασμού.

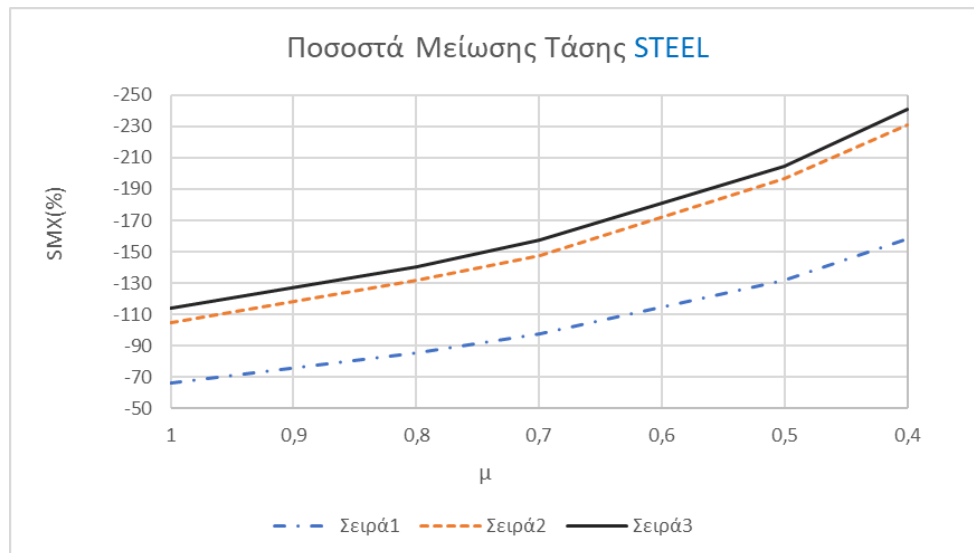
DMX(%)			
μ	120kN	180kN	240kN
1	3,589744	8,743169	7,784431
0,8	4,081633	9,72973	8,695652
0,7	4,081633	10,45576	9,233792
0,5	5,050505	10,93333	9,94152
0,4	5,050505	11,17021	10,6383

Πίνακας 5.1: Ποσοστό Αύξησης της μετατόπισης διαβρωμένου και μη διαβρωμένου χάλυβα.

Στον πίνακα 5.1 παρατηρείται πως στην περίπτωση που ο χάλυβας έχει διαβρωθεί παρουσιάζονται μεγαλύτερες βυθίσεις σε σχέση με μια υγιή διατομή.

STEEL	SMX(%)		
μ	120kN	180kN	240kN
1	-66.1439	-104.865	-114.108
0.8	-85.5283	-131.637	-140.652
0.7	-97.792	-147.796	-157.819
0.5	-132.164	-196.442	-204.628
0.4	-158.386	-230.876	-240.85

Πίνακας 5.2: Ποσοστό μείωσης της εφελκυστικής τάσης του διαβρωμένου και μη διαβρωμένου χάλυβα.

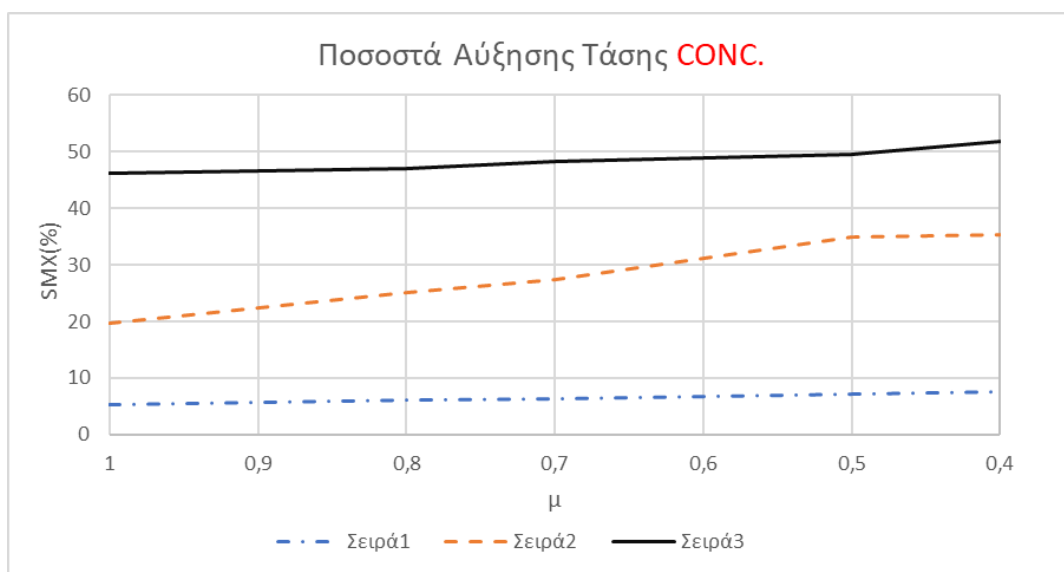


Διάγραμμα 5.4: Διαγραμματική Αναπαράσταση του Πίνακα 5.2.

Στο Διάγραμμα 5.4 παρατηρείται πως και στις τρεις περιπτώσεις φορτίσεων οι καμπύλες προσεγγίζουν ευθείες με παρόμοια κλίση. Αξιοσημείωτο είναι πως στις περιπτώσεις φόρτισης των 180 και 240 kN οι ποσοστιαίες μειώσεις έχουν παρόμοιες τιμές παρόλο που αυτές των 240 kN είναι μεγαλύτερες. Στην φόρτιση των 120 kN η μεγαλύτερη κλίση που εμφανίζεται μετά το $\mu=0,5$ οφείλεται στην ρηγμάτωση του σκυροδέματος.

CONC.	SMX(%)		
μ	120kN	180kN	240kN
1	5,384227	19,62758	46,22821
0,8	6,024938	25,10863	47,01433
0,7	6,36494	27,51583	48,37418
0,5	7,091263	34,86156	49,48415
0,4	7,481552	35,35003	51,94404

Πίνακας 5.3: Ποσοστό αύξησης της εφελκυστικής τάσης του σκυροδέματος στην περίπτωση διαβρωμένου και μη διαβρωμένου χάλυβα.



Διάγραμμα 5.5: Διαγραμματική αναπαράσταση του πίνακα 5.3.

Στο Διάγραμμα 5.5 παρατηρείται πως και στις τρεις περιπτώσεις φορτίσεων οι καμπύλες προσεγγίζουν ευθείες με παρόμοια κλίση. Αξιοσημείωτο είναι πως στις περιπτώσεις φόρτισης εμφανίζονται παρόμοιες ποσοστιαίες αυξήσεις στις περιπτώσεις φόρτισης των 180 και 240 kN, οι οποίες όμως δεν είναι τόσο κοντά όσο οι αντίστοιχες ποσοστιαίες μειώσεις που παρατηρούνται στον χάλυβα. Γενικότερα εμφανίζονται μικρότερα ποσοστά από αυτά του χάλυβα και η φόρτιση των 120kN είναι πιο κοντά στις υπόλοιπες τιμές σε σχέση με το διάγραμμα 5.4.

5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

† Όσο μειώνεται ο συντελεστής τριβής, κατά την ίδια φόρτιση, δηλαδή όσο εντονότερη είναι η διάβρωση, αναλογικά μεγαλύτερες είναι και οι μετατοπίσεις.

† Όσο αυξάνεται η διάβρωση, κατά την ίδια φόρτιση, η συνεισφορά του χάλυβα στην εφελκόμενη αλλά και στην θλιβόμενη ζώνη είναι αναλογικά μικρότερη. Επομένως το σκυρόδεμα καλείται να αναλάβει μεγαλύτερα φορτία στον εφελκυσμό.

† Με σταθερούς συντελεστές τριβής, εφαρμόζοντας αυξανόμενες φορτίσεις, εμφανίζονται μεγαλύτερες μετατοπίσεις.

† Με σταθερούς συντελεστές τριβής, εφαρμόζοντας αυξανόμενες φορτίσεις, η συνεισφορά του χάλυβα στην εφελκόμενη αλλά και στην θλιβόμενη ζώνη ελλατώνεται σημαντικά.

† Στον χάλυβα με συντελεστή τριβής 0,7, δηλαδή όταν εμφανίζεται περίπου 10% απώλεια μάζας, η συνεισφορά του στην παραλαβή τάσεων μπορεί να μειωθεί 2,5 φορές. Στην ίδια περίπτωση το φορτίο που παραλαμβάνει το σκυρόδεμα είναι 1,5 φορά το αρχικό.

† Βάσει των παρουσιαζόμενων αριθμητικών στοιχείων γίνεται αντιληπτό πως η επίδραση της διάβρωσης σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος δεν μπορεί να παρακάμπτεται.

† Πρίν από κάθε ενέργεια επέμβασης θα πρέπει να γίνεται μελέτη αποτίμησης της συμβολής της διάβρωσης των οπλισμών στην φέρουσα ικανότητα της ακάστοτε κατασκευής.

† Σε κάθε περίπτωση επέμβασης, είτε πρόκειται για επισκευή ή ενίσχυση, είναι αναγκαία η αναστολή των φαινομένων διάβρωσης μέσω των κατάλληλων τεχνικών. Καθώς αποτελεί ένα φαινόμενο το οποίο ακόμη και αν είναι σε αρχικό στάδιο και δεν δοθεί η απαραίτητη σημασία μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικά και δαπανηρά αποτελέσματα.

† Είναι απαραίτητο σε κάθε μελλοντικό έργο να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη όλοι οι παράγοντες, από το σχεδιασμό έως και την τελευταία φάση της κατασκευής του, οι οποίοι μπορεί δυνητικά να οδηγήσουν σε διάβρωση.

6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου, “Δομικά Υλικά”, Διάβρωση οπλισμών,σελ.122-123, 2013

[2] Χρ. Σπανός, Μ.Σπιθάκης και Κ. Τρέζος, “Πρακτικά-Διδακτικά Εγχειρίδια, Μέθοδοι για την Επιτόπου Αποτίμηση των Χαρακτηριστικών των Υλικών”, 4.14 Ενθράκωση, σελ.75-76, 2001

[3] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, “Μηχανική Συμπεριφορά Διαβρωμένων Χαλύβων Οπλισμένου Σκυροδέματος”, Διάβρωση του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος, σελ.25-26, 2007

- [4] J Gulikers, “Critical Review Of Corrosion Deterioration Models For Reinforced Concrete”, STRUCTURAL CONSEQUENCES OF REINFORCEMENT CORROSION, pp.1-4, 2002
- [5] LamyaAmleh and Alaka Ghosh, “Modeling the effect of corrosion on bond strength at the steel-concrete interface with finite-element analysis”, Impact of corrosion on reinforced concrete structures, pp.673-679, 2006
- [6] ΕΚΩΣ 2000, Εφελκυστική Αντοχή, σελ.59
- [7] ΚΤΧ2008, Χαρακτηριστικά χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος, σελ.19
- [8]https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/prod_page.html?pn=Mechanical%20APDL&prodver=19.5&lang=en(ANSYS HELP Topics)